



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Schalungsmethode zur nachhaltigen Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten und un stetigen Oberflächen

Oliver Gericke
Walter Haase
Werner Sobek

Institut für
Leichtbau Entwerfen
und Konstruieren,
Universität Stuttgart

Für die Herstellung von Schalungen für Betonbauteile, die sowohl gekrümmte als auch un stetige Oberflächen aufweisen, stellt das Fräsen einer Schalungsgeometrie eine Methode mit höchster Präzision dar, die jedoch mit großem Arbeits- und Ressourcen-aufwand verbunden ist.

Im vorliegenden Artikel wird eine Schalungsmethode beschrieben, mit der das Problem des hohen Ressourcenaufwands von gefrästen Schalungen durch die Auswahl eines wiederverwendbaren Schalungsmaterials umgangen wird. Vertieft wird die Erprobung dieser Methode mit den Schalungsmaterialien Sand und Ton beschrieben.

1 Einführung

Computergestützte Methoden ermöglichen den Entwurf von Tragwerken und Bauteilen, deren Form optimal an ihre vorgesehene Aufgabe angepasst ist. Es ergibt sich das Potential zur Minimierung des Gewichts, der Menge der eingesetzten Ressourcen und damit auch der grauen (embodied) Energie eines Bauteils. Dies geht einher mit einer großen Anzahl möglicher Bauteilgeometrien. Gerade für den Baustoff Beton beschränkt sich jedoch die Vielfalt der Formen, die mit wirtschaftlich vertretbaren Methoden hergestellt werden können, weitestgehend auf Geometrien, die entlang der Bauteilachsen unveränderlich sind.

Um die Möglichkeiten des Werkstoffs Betons besser ausnutzen zu können, werden neue Methoden benötigt, mit denen die Herstellung von Bauteilen mit annähernd beliebigen Geometrien möglich ist. Der Ansatz der im vorliegenden Artikel beschriebenen Schalungsmethode liegt darin, eine große Vielfalt an herstellbaren Formen zu ermöglichen. Um das Potential der Ressourceneffizienz von formoptimierten Bauteilen nicht einzuschränken, wird zusätzlich eine Möglichkeit beschrieben, die Schalung frei von Abfall zu fertigen.

2 Schalungsmethode

2.1 Stand der Technik

Zur Herstellung von Betonbauteilen und -tragwerken mit stetigen, einfach oder doppelt gekrümmten Oberflächen wurden in der Vergangenheit verschiedene Methoden entwickelt, die auf der Verwendung einer flexiblen Schalhaut beruhen. Für die Herstellung vor Ort ist dabei die Methode der pneumatisch vorgespannten Membran [1] sowie die Methode einer zugeschnittenen Membranhaut, die mit Beton aufgefüllt wird [2, 3], exemplarisch. Die Herstellung von Fertigteilen erfolgt im Allgemeinen unter Anwendung einer Schaltischmethode [4, 5]. Hierbei wird eine flexible Schalhaut durch verfahrbare Stempel an der Unterseite in eine gewünschte Form mit einfacher oder doppelter Krümmung gebracht.

Den genannten Schalungsmethoden ist gemeinsam, dass sich die Schalhaut beim Einbringen des Betons verformt und das entstehende Bauteil nicht die Form der ursprünglichen, sondern die der deformierten Schalung abbildet. Dies ist aufgrund der

Flexibilität der Schalhaut, welche die räumliche gekrümmte Oberfläche der resultierenden Bauteile ermöglicht, ein der Methode inhärenter Nachteil.

Um eine geringere Verformung der Schalhaut zu erreichen, kann eine feste Schalung aus einem Material mit geringerer Dichte als Beton auf einem Schaltisch hergestellt werden. Hierbei wird ein flüssiges Schalungsmaterial (z. B. Wachs bei [6]) auf den Schaltisch gegossen und erhärtet dort. Die Methode bietet die Möglichkeit, auch größere, mehrteilige Schalungen mit einem Schaltisch herzustellen. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Präzision der Methode durch die Volumenänderungen des Schalungsmaterials beim Phasenübergang beeinträchtigt wird.

Fräsen wird als die Methode angesehen, die abhängig von der eingesetzten Maschine eine große Formenvielfalt mit hoher Präzision vereint [7]. Diesen Vorteilen stehen die Nachteile der hohen Arbeitsintensität sowie des hohen Abfallaufkommens durch Fräsen aus Vollmaterial gegenüber, denn bei den gängig verwendeten Materialien (z. B. Polystyrol bei [8]) fällt i. d. R. eine große Menge Abfall an. Die Methode kann daher unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit als äußerst kritisch bewertet werden.

2.2 Auswahl der Methode

Im Folgenden wird die weiterführende Untersuchung von gefräster Schalung beschrieben. Die Auswahl dieser arbeits- und abfallintensiven Methode erfolgt, da die Vielfalt der herstellbaren Formen für eine neue Schalungsmethode als Priorität erachtet wird. Um dem kritischen Aspekt der großen Abfallmenge zu begegnen, wird ein Schalungsmaterial ausgewählt, das beliebig häufig wiederverwendet und im Fall der Entsorgung in einen biologischen oder technischen Stoffkreislauf rückgeführt werden kann.

Die Forderung der Wiederverwendbarkeit ist in der Schalungsmethode nach [6] bereits erfüllt. Hier wird das Material Wachs verwendet, das mit geringem energetischem Aufwand in einen flüssigen Aggregatzustand überführt werden kann. Für die gewählte Schalungsmethode wird daher ein Material ausgewählt, das einfach zwischen einem flüssigen bzw. plastischen und einem festen Aggregatzustand überführt werden kann. Wichtig ist dabei, dass der feste Aggregatzustand des Schalungsmaterials entweder unter Normalklima besteht oder energetisch einfach erreicht und aufrechterhalten werden kann.

3 Erprobte Methode

3.1 Material

Als Schalungsmaterial wird die Bodengruppe der Feinböden (Sand, Schluff, Ton) ausgewählt. Im Speziellen werden ein Quarzsand mit feiner Sieblinie (0,063–0,315 mm) und eine Tonmasse (Firma Witgert, Herschbach, plastische Masse 11M) untersucht.

Feinböden sind, bei entsprechender Beimischung von Wasser, unter Normalklima plastisch verformbar. Das Gemisch kann durch Abkühlung in einen festen Zustand überführt werden. Dieser Zustand muss durch geeignete Maßnahmen mindestens bis zum Ende der Bearbeitung aufrechterhalten werden.

Es werden nachfolgend die Versuche zu den einzelnen Bearbeitungsschritten in chronologischer Reihenfolge eines Herstellungszyklus beschrieben. Die Versuche werden dabei in kleinem Maßstab (Probengröße L/B/H = 33/20/6 cm) durchgeführt.

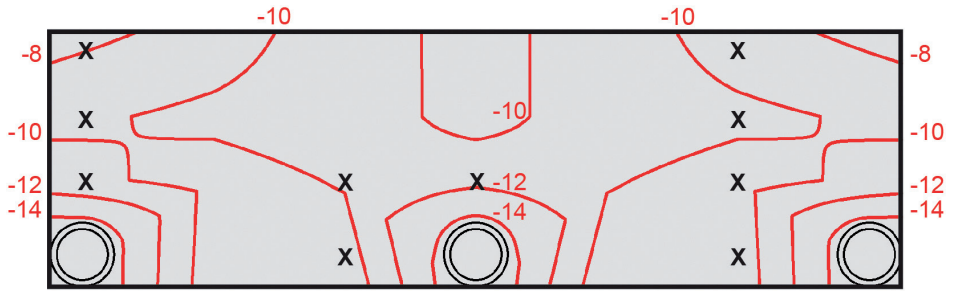


Bild 1: Querschnitt durch das Schalungsmaterial und Isotherme im thermisch stationären Zustand. Zahlenwerte sind in °C angegeben. Die Positionen der Temperaturemessfühler sind mit X markiert.

3.2 Temperierung

Da die Temperatur des Schalungsmaterials auch während der Bearbeitung unter dem Gefrierpunkt von Wasser gehalten werden muss, werden Kühlrippen in die Probenformen eingebracht, die Teil eines Durchlaufkühlsystems sind. Es wird ein Durchlaufkühler FL601 der Firma Julabo verwendet, der mit einer möglichen Kühlleistung von 0,2 kW bei -20 °C betrieben wird. Der Gefrierpunkt des Wasser-Glycerin-Gemischs, welches als Kühlmedium verwendet wurde, beträgt -20 °C, weshalb die Zieltemperatur der Kühlung zu -19 °C gewählt wird. Um den Temperiervorgang zu beschleunigen, wird die Probe zusätzlich mit einer 20 mm dicken Polystyrolplatte abgedeckt.

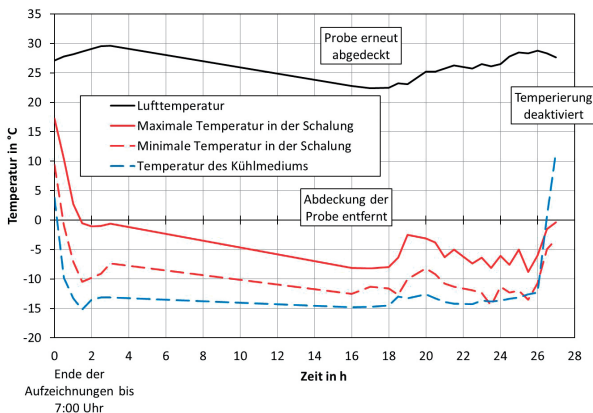


Bild 2: Über den Messzeitraum gemessene Temperaturen im Schalungsmaterial; zusätzlich sind die Umgebungstemperatur und die Temperatur des Kühlmediums dargestellt.

In einem Versuch wird das Temperaturprofil in Probenmitte (in Längsrichtung) ermittelt. Die Platzierung der zehn Thermoelemente vom Typ K erfolgt unter der Annahme eines symmetrischen Verlaufes der Temperatur. Für den Verlauf der Isothermen (Bild 1) wird ein linearer Temperaturverlauf zwischen den Thermoelementen sowie eine konstante Temperatur des Kühlmediums unterstellt. Mit der Darstellung der Isothermen während des thermisch stationären Zustands (Bild 1) wird deutlich, dass die Probe mit der gewählten Methode vollständig eingefroren werden kann. Nach Erreichen des thermisch stationären Zustands wird die Styroporplatte abgenommen und eine Tasche mit den Dimensionen $L/B/H = 10/10/1$ cm in die Probe gefräst. Bild 2 zeigt deutlich, dass die Probe auch während der Bearbeitung nicht taut.

In einem weiteren Versuch wird die Temperierung des Schalungsmaterials unter gleichzeitiger Bearbeitung durch eine CNC-Fräse erprobt.

3.3 Formgebende Bearbeitung

Unter Berücksichtigung der nachfolgend beschriebenen Versuche werden für die Bearbeitung mittels Fräsen drei Kriterien mit übergeordneter Bedeutung identifiziert:

1. Abnutzung des verwendeten Fräasers,
2. Absaugung des abgefrästen Materials,
3. Qualität der erzeugten Form.

Mit den in Bild 3 dargestellten benutzten Fräsern wurde jeweils mit einem Gesamtvorschub von 30 Meter eine 15 mm tiefe Nut in einen Feinsand gefräst. Es kann festgestellt werden, dass die aus unterschiedlichen Materialien bestehenden Fräser unterschiedlich starke Abnutzungserscheinungen aufweisen. Dies wird hauptsächlich auf die bessere Eignung des Vollhartmetalls gegenüber dem Schnellschnittstahl für die Bearbeitung von abrasiven Werkstoffen zurückgeführt.

Zusätzlich ist die Absaugung von übergeordneter Bedeutung. Werden abgefräste Späne nicht sofort abgesaugt, können diese wieder im Material festfrieren und nur durch erneutes Abfräsen entfernt werden. In allen beschriebenen Versuchen wurde die Absaugung mit einer händisch ausgerichteten Absauganlage vom Typ Cleantex CTM 33 E SG der Firma Festool durchgeführt.



Bild 3: Von links nach rechts: gebutzter Vollhartmetall-Fräser, ungenutzter Vollhartmetall-Fräser, gebutzter Schnellschnittstahl-Fräser, ungenutzter Schnellschnittstahl-Fräser

[Foto: ILEK, Oliver Gericke]

Die Qualität der erzeugten Form hängt wesentlich vom Zahnvorschub des Fräasers ab. Der Zahnvorschub ist der Vorschub einer Schneide während einer Drehung des Fräasers. Ist der Zahnvorschub zu klein, findet keine Spanabnahme statt, was hinsichtlich der resultierenden Oberflächen- und Kantenqualität als äußerst kritisch zu bewerten ist. Bei einem Zahnvorschub, der größer ist als das Größtkorn des verwendeten Schalungsmaterials, werden im Allgemeinen die besten Ergebnisse erzielt.

Gerade beim Schalungsmaterial Ton kann festgestellt werden, dass ein dauerhaft zu geringer Zahnvorschub zum lokalen Antauen des Materials führt. Der Fräser spant das angetaute Schalungsmaterial nicht ab, sondern verschiebt es lediglich. Die resultierende Geometrie kann in diesem Fall sehr stark von der geplanten abweichen.

3.4 Betonieren

Die im Folgenden beschriebenen Versuche dienen der Ermittlung der Betonierparameter, die notwendig sind, damit das hergestellte Betonbauteil die Schalungsform möglichst unbeeinträchtigt abbildet. Um das Schalungsmaterial nicht zu verunreinigen und dadurch die Wiederverwendbarkeit einzuschränken, wird zunächst kein Trennmittel verwendet.

In einem ersten Schritt wird der Einfluss von verschiedenen Verdichtungsmethoden auf das resultierende Bauteil untersucht. Hierbei kommen mechanische Verdichtungsmethoden, wie die Methode des Rütteltisches, sowie die Beimischung von Fließmitteln zum Einsatz. Als Schalungsmaterial wird Quarzsand verwendet, in den eine getreppte Form gefräst wird. Das Betonbauteil besteht aus Normalbeton. Mit den Resultaten der verschiedenen Verdichtungsmethoden (Bild 4) kann festgestellt werden, dass mechanische Verdichtungsmethoden die Form der Schalung erheblich beeinträchtigen. Zusätzlich wird deutlich, dass Beton unter Beimischung von Fließmittel und ohne Zusatzstoffe Luftlöcher an der Oberfläche aufweist. Um eine homogene Oberfläche zu erreichen, wird daher für weitere Versuche ein selbstverdichtender Beton (SVB, Sika Grout 551) verwendet. Die Oberflächen resultierender Bauteile aus SVB sind von homogener und gleichbleibender Qualität (siehe Bild 5). Es kann jedoch festgestellt werden, dass auf Sand hergestellte Bauteile eine sehr raue Oberfläche aufweisen.

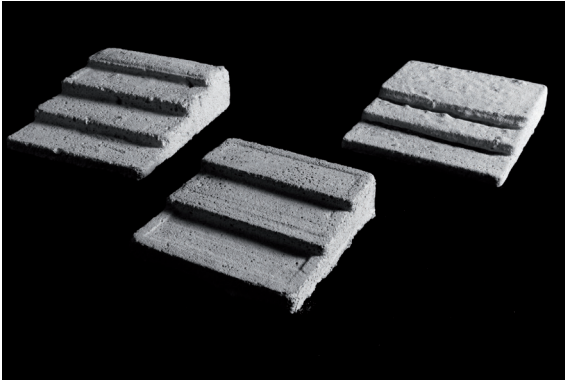


Bild 4: Auf Sandschalung hergestellte Normalbetonbauteile mit den Maßen L/B 18/16 cm. Die Höhe beträgt je Stufe 1 cm. Die Herstellung der einzelnen Proben erfolgte ohne Verdichtungsmaßnahmen (hinten links), mit Verdichtung auf einem Rütteltisch (hinten rechts) und mit Fließmittel versetztem Beton (vorn).

[Foto: ILEK, Oliver Gericke]

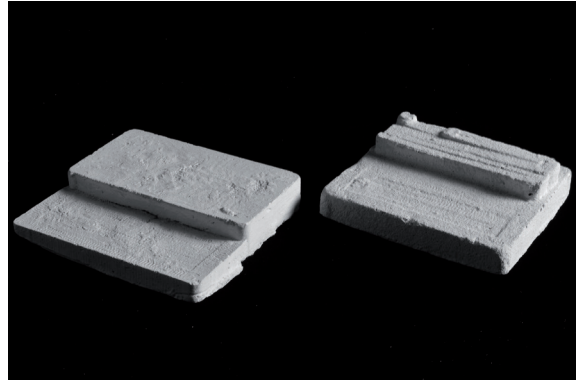


Bild 5: Auf Tonschalung (links, L/B/H 10/11/3 cm) bzw. Sandschalung (rechts, L/B/H 11/12/2,5 cm) hergestellte Bauteile aus selbstverdichtendem Beton [Foto: ILEK, Oliver Gericke]

In einem weiteren Versuch können, unter Verwendung der Tonmasse als Schalungsmaterial, an den abgefrästen Flächen Bereiche zusammenhängenden Eises (Eisadern) festgestellt werden. Um das Auftreten der Eisadern, die durch das resultierende Bauteil abgebildet werden (siehe Bild 5), zu verhindern, wird der Wassergehalt in der Tonschalung reduziert. Es kann festgestellt werden, dass die Reduktion des werkmäßigen Anmachwasseranteils von 24 Masse-% um 3 Masse-% zu einem nahezu vollständigen Ausbleiben der Eisadern führt. Trotz der Reduktion der Eisadern weisen die auf einer Tonschalung hergestellten Bauteile jedoch keine gleichbleibende Qualität auf. Dieses Problem ist noch Gegenstand von Untersuchungen.

4 Fazit und Ausblick

Die grundsätzliche Machbarkeit der Methode der gefrästen Feinbodenschalung kann als erwiesen erachtet werden. Während die Qualität bei der Anwendung von Sand als Schalungsmaterial gleichbleibend ist, sind die Parameter für eine Schalung, die den Möglichkeiten des Werkstoffes genügt, für den Werkstoff Ton noch zu ermitteln. Im weiteren Verlauf bis zum Abschluss des Forschungsprojekts wird der Fokus daher auf die Fertigungsparameter für den Werkstoff Ton gelegt. Im Sinne der Schalungsmethode wird zusätzlich ein unter Normalklima festes Schalungsmaterial ermittelt und erprobt.

Literaturverzeichnis

- [1] SOBEK, W.: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1987.
- [2] WEST, M.: Fabric-Formed Concrete Members. Concrete International 25 (2003), Heft 10, S. 55–60.
- [3] WEST, M.: Fabric-Formed Concrete Columns. Concrete International 26 (2014), Heft 6, S. 42–45.
- [4] PRONK, A.; VAN ROOY, I.; SCHINKEL, P.: Double-curved surfaces using a membrane mould. In: DOMINGO, A.; LAZARO, C. (Hrsg.): Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, 28.09.–02.10.2009 in Valencia (Spanien), S. 618–628.
- [5] SCHIPPER, R.; JANSSEN, B.: Manufacturing Double Curved Precast Concrete Panels. Concrete Plant International (2011), Heft 4, S. 32–38.
- [6] OESTERLE, S.; VANSTEENKISTE, A.; MIRJAN, A.: Zero Waste Free-Form Formwork. In: ORR, J.; EVERNDEN, M.; DARBY, A.; IBELL, T. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, 27.–29.06.2012 in Bath (GB), Bath: University of Bath, 2012, S. 258–267.
- [7] RAUN, C.; KRISTENSEN, M. K.; HIRKEGAARD, P. H.: Flexible Mould for Precast Concrete Elements. In: ZHANG, Q.; YANG, L.; HU, Y. (Hrsg.): Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2010, 08.–12.11.2010 in Shanghai (China), S. 2726–2737.
- [8] OTTO, K.; SCHUMACHER, M.: Erweiterung unter dem Garten – Städel Museum in Frankfurt am Main. Detail 53 (2013), Heft 4, S. 390–398.

Automatisierte adaptive Schalungsmethoden zur Herstellung von Betonbauteilen mit gekrümmten Oberflächen

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Projektbearbeiter

Dr.-Ing. Walter Haase
Dipl.-Ing. Oliver Gericke

Projektlaufzeit

10/2011 – 09/2014

Web

<http://www.uni-stuttgart.de/ilek/>